

COMPORTAMIENTO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR ASOCIADA A LA MEDIDA DEL NIVEL PROMEDIO DE L_2 SEGÚN NORMA UNE EN ISO 140-5: 1999 EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN DEL RECINTO Y DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

PACS: 43.55.Br

M^a. Angeles Navacerrada, César Díaz Sanchidrián y Antonio Pedrero
Grupo de Investigación de Acústica Arquitectónica
Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid
Avda. Juan de Herrera 4
28040 Madrid
Teléfono: 913 364 249
Fax: 913 366 554
E-mail: cesar.diaz.sanchidrian@upm.es

ABSTRACT

We have performed a comparative study between the standard deviation of the sound pressure levels measured in the receiving room as a function of the volume, following UNE EN ISO 140-5 and the theoretical models published in the literature. We have chosen rooms of residential use with volumes ranging between 15 and 60 m³. We have also analyzed the standard deviation of the averaged sound pressure value: fixed the reverberation time there is not a relevant dependence on the room volume and fixed the volume the deviation increases slowly when the reverberation time decreases.

RESUMEN

Se ha llevado a cabo una comparación de la desviación estándar de los niveles de presión sonora medidos en el recinto receptor en función del volumen para ensayos de aislamiento a ruido aéreo de fachadas según norma UNE EN ISO 140-5 con los modelos teóricos publicados. Se han escogido recintos de uso residencial de volúmenes comprendidos entre 15 y 60 m³. Se analiza también la desviación estándar del valor promedio del nivel de presión: fijado el tiempo de reverberación no hay una dependencia significativa con el volumen del recinto y para un volumen dado la desviación estándar aumenta ligeramente cuando el tiempo de reverberación disminuye.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de una medición acústica es asignar un valor al mesurando. Este valor es únicamente una aproximación o estimación del mesurando y debe ir acompañado de una indicación de la incertidumbre en la medición [1]. Aunque se considera que el valor asignado al mesurando es su mejor estimación, la incertidumbre refleja el grado de desconocimiento que se tiene de su valor exacto.

El código técnico de la edificación en su Documento Básico de Protección frente al Ruido (CTE DN HR) [2] recoge la necesidad social de control de los niveles de ruido en vivienda. Un concepto muy importante en la legislación y la normativa acústica son los niveles de aislamiento acústico que sirven para dictar valores y límites. En este sentido, es de interés el análisis de la incertidumbre asociada a la medida de estos niveles ya que debe ser tomada en cuenta en la toma de decisiones, aceptación o rechazo, respecto a los límites establecidos. Los diferentes descriptores del aislamiento acústico tienen como base la diferencia de niveles sonoros en los recintos emisor y receptor, que se obtienen mediante el promedio espacio-temporal de los niveles sonoros en cada uno de estos recintos. En el caso ideal de que los campos sonoros en los recintos de ensayo fuesen totalmente difusos, los niveles sonoros en los recintos serían absolutamente uniformes. Sin embargo, debido fundamentalmente a los modos propios, en la práctica se obtiene una cierta dispersión entre los valores del nivel de presión sonora que se miden en los diferentes puntos de los recintos. En esta línea, el valor de la incertidumbre combinada resultante para las distintas magnitudes de salida según la norma UNE EN ISO 140 [3] depende fundamentalmente de la dispersión de las medidas que se tomen para obtener el nivel promedio de presión sonora en los recintos emisor y receptor.

En la literatura se han publicado diferentes estudios sobre la distribución espacial de los niveles de presión sonora en un recinto para explicar desde un punto de vista teórico el significado del valor promedio del nivel de presión sonora que se utiliza para hacer los cálculos en los ensayos de aislamiento. En esta línea, se han desarrollado modelos teóricos para describir el campo sonoro en las proximidades de las paredes del recinto, se ha analizado la distribución espacial del campo sonoro debido a la presencia de los modos normales del recinto o considerando un campo sonoro difuso ideal [4], [5]. Lo más significativo de la distribución del campo sonoro son las grandes variaciones espaciales de la presión sonora. Los niveles más altos corresponden a las paredes del recinto. Las mayores diferencias entre el campo sonoro en la pared del recinto y un punto alejado ocurren a distancias menores que $\frac{\lambda}{4}$ desde la superficie. A altas frecuencias y/o distancias muy grandes desde la superficie la diferencia entre los niveles de presión sonora tiende a 0 dB. Por ello, en la medida del nivel de presión sonora en un recinto es necesario evitar medir cerca de los límites del recinto.

En el Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid se han llevado a cabo medidas de aislamiento acústico a ruido aéreo en fachadas según la norma UNE-EN ISO 140-5 [6] en recintos de uso residencial (dormitorios y salones) de volúmenes comprendidos entre 15 y 60 m³. Este intervalo de volúmenes es representativo de los recintos que en España podemos encontrar en las viviendas de tamaño pequeño y medio. Se ha calculado la desviación estándar como una medida de la dispersión de los niveles de presión sonora medidos en el recinto receptor. Se han comparado los valores experimentales calculados con los modelos teóricos que para describir el comportamiento de esta magnitud se han publicado en la literatura. Igualmente se ha calculado la desviación estándar del valor promedio del nivel de presión sonora, utilizado en el cálculo de las magnitudes finales. Se presentan resultados sobre las tendencias de la desviación estándar del valor promedio: para un volumen fijo se analiza su variación en función del tiempo de reverberación y fijado el tiempo de reverberación el cambio en función del volumen del recinto.

2. MÉTODO DE MEDIDA

La norma que dicta como se han de realizar los ensayos de medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción es la UNE-EN ISO 140. La parte 5 [6] de esta Norma, "Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas" especifica dos métodos para la medición del aislamiento a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas completas. Los valores de L_2 medidos en el interior de los recintos y utilizados en este trabajo corresponden a la medida de fachadas completas siguiendo el método con altavoz.

El nivel de presión sonora promedio se ha obtenido mediante un único micrófono que se ha ido situando en 5-6 posiciones diferentes del recinto. La Norma especifica que en cada local deben usarse como mínimo cinco posiciones de micrófono. Las posiciones deben distribuirse uniformemente en el máximo espacio permitido dentro de cada local. Según la Norma para medidas realizadas en un margen de frecuencias comprendido entre 100 y 5000 Hz los valores de distancias de separación deben ser mayores que 0,7 m entre posiciones de micrófonos, que 0,5 m entre cualquier posición de micrófono y las superficies límites de la habitación o de objetos y que 1,0 m entre cualquier posición de micrófono y la fuente sonora. Esto nos ha llevado a combinar posiciones de micrófonos en las esquinas con posiciones en la región central de cada uno de los recintos. A partir de la medida de los niveles de presión sonora L_{21} , L_{22} , ..., L_{2n} en las diferentes posiciones dentro del recinto se calcula el nivel de presión sonora en el recinto, $\overline{L_2}$, como el promedio energético de los mismos:

$$\overline{L_2} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{2j}}{10}}$$

La siguiente expresión nos permite calcular la desviación estándar de los niveles de presión sonora L_{21} , L_{22} , ..., L_{2n} medidos en el recinto:

$$\sigma(L_2) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (L_{2j} - \overline{L_2})^2}$$

Esta desviación estándar se puede interpretar como una medida de la dispersión espacial de los niveles de presión sonora en un recinto y con este significado se ha usado en la discusión de nuestros resultados. Finalmente, se puede calcular la desviación estándar del valor promedio de L_2 siguiendo la evaluación "Tipo A" descrita en la GUM [1]:

$$\sigma(\overline{L_2}) = \frac{\sigma(L_2)}{\sqrt{n}}$$

En la Tabla I se indica el número de recintos medidos para cada rango de volúmenes: los volúmenes se han agrupado en intervalos de 5 m³. Todos los recintos medidos estaban amueblados tratándose de salones o dormitorios.

VOLUMEN (m³): número de recintos	VOLUMEN (m³): número de recintos
(12,5-17,5 m ³): 9	(37,5 – 42,5 m ³): 30
(17,5 – 22,5 m ³): 21	(42,5 - 47,5 m ³): 12
(22,5 – 27,5 m ³): 46	(47,5 – 52,5 m ³): 9
(27,5 – 32,5 m ³): 45	(52,5 – 57,5 m ³): 11
(32,5 – 37,5 m ³): 32	(57,5- 62,5 m ³): 11

Tabla I. Número de recintos medidos para cada uno de los volúmenes comprendidos entre 15 y 60 m³.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis que presentamos es importante describir las características del campo sonoro generado en el recinto receptor. Sobre el campo sonoro la norma UNE EN ISO 140-5 especifica que se debe generar un campo sonoro estacionario con un espectro continuo en el rango de frecuencias considerado. Para ello se indica que las diferencias de niveles de potencia sonora entre las bandas de tercio de octava que forman una octava no deben superar 6 dB en la banda de octava de 125 Hz, 5 dB en la banda de 250 Hz y 4 dB en las bandas superiores. En todas las bandas de frecuencia relevantes, el nivel de potencia sonora de la fuente de ruido debe ser lo suficientemente alto como para que el nivel de presión sonora en el local receptor exceda al ruido de fondo en 6 dB como mínimo. La frecuencia de Schroeder f_s o

de corte [7] nos permite estimar la frecuencia por encima de la cual los fenómenos resonantes dejan de ser predominantes y el campo sonoro puede considerarse difuso. En la Figura 1 se ha representado en función del volumen y para varios tiempos de reverberación los valores de f_s calculados mediante la expresión $f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$ siendo T el tiempo de reverberación promedio y V el volumen del recinto. Los valores oscilan entre los 400 y 200 Hz dependiendo del volumen del recinto.

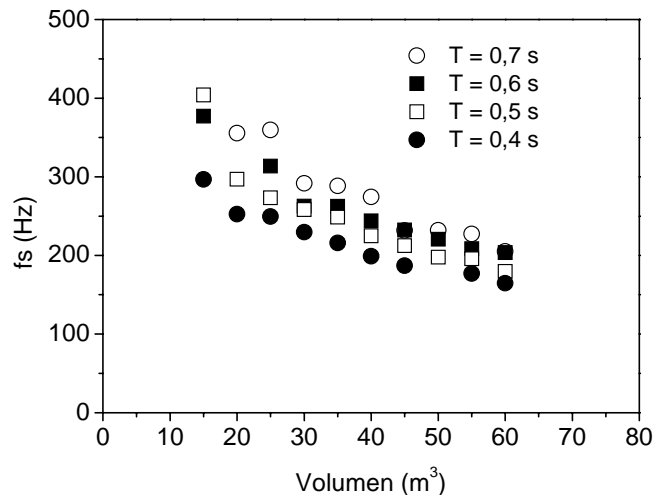


Figura 1. Representación de la frecuencia de Schroeder f_s en función del volumen para varios tiempos de reverberación de los recintos comprendidos entre 0,4 y 0,7 s.

Una manera sencilla de cuantificar la variación espacial del nivel de presión sonora medido en un recinto es mediante el valor de la desviación estándar. En la Figura 2 como ejemplos representativos de los ensayos realizados se muestra la desviación estándar en función de la frecuencia para cuatro volúmenes diferentes. De los gráficos se deduce que en general, la desviación estándar es mayor a bajas frecuencias donde el reducido número de modos normales causa un alto grado de variación espacial en el campo sonoro. En general, los niveles mayores de presión sonora se miden en las esquinas y en los puntos próximos a las superficies de las paredes y el suelo, los niveles más bajos corresponden al centro del recinto. Desde un punto de vista teórico, en el rango de baja frecuencia, se han calculado diferencias entre 17 y 28 dB entre las proximidades de las paredes límite y el centro del recinto. A frecuencias más altas, por encima de la frecuencia de corte o f_s el campo sonoro comienza a ser más uniforme. En estas condiciones, las diferencias calculadas entre el campo sonoro en las esquinas y paredes suele ser entre 3 y 6 dB mayor que en el centro. En los ejemplos de la figura 2 los valores de la desviación estándar se han comparado con lo que predicen las expresiones teóricas publicadas en la literatura.

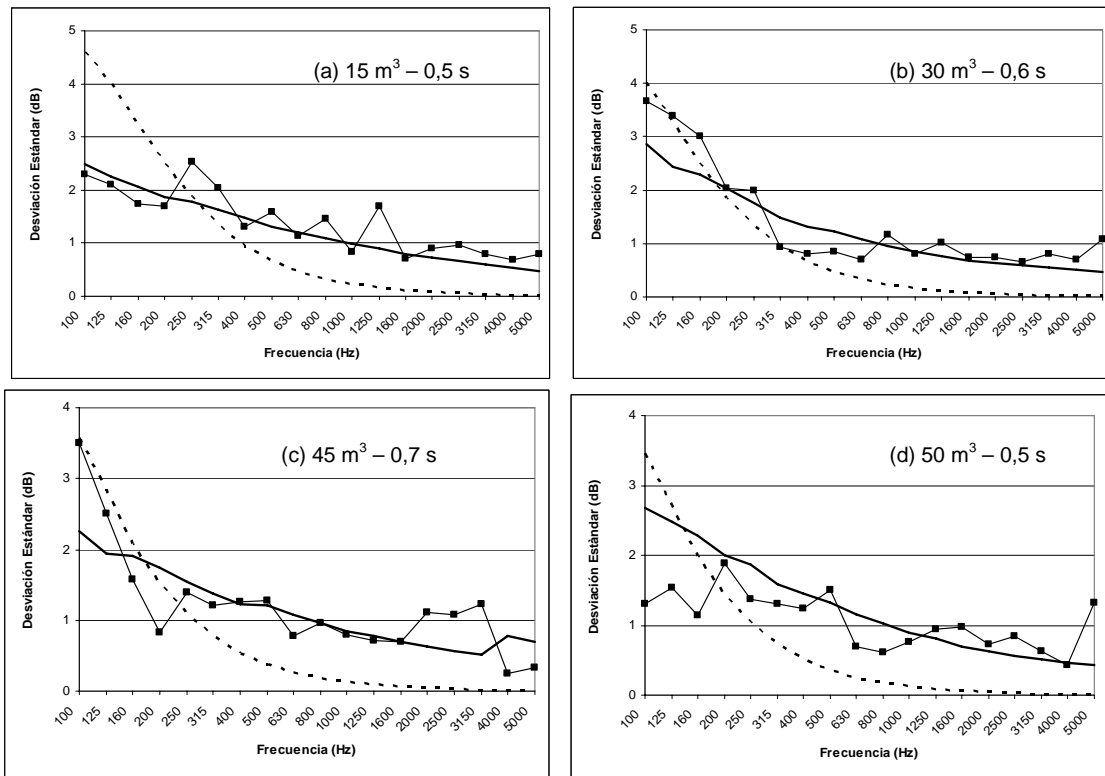


Figura 2. Desviación estándar experimental (línea + símbolo) en función de la frecuencia para cuatro volúmenes diferentes. En todos los ejemplos se comparan los valores experimentales con los modelos teóricos descritos por las expresiones (1) (línea discontinua) y (2) (línea continua).

Para estimar desde un punto de vista teórico la desviación estándar es necesario conocer el tipo de distribución espacial de los niveles de presión sonora en el recinto. El tipo de distribución espacial depende del tipo de fuente sonora utilizada. En la literatura las expresiones teóricas se han calculado suponiendo una distribución gamma. En el caso de medidas de aislamiento en el que se hace un muestreo espacial con un micrófono colocado en distintas posiciones y en los que en un principio la contribución del campo directo no es significativa, la distribución espacial se ajusta a una distribución gamma en el recinto emisor y conduce a resultados razonables en el recinto receptor. Bajo estas condiciones, el valor teórico de la desviación estándar para frecuencias por debajo de f_s , o más concretamente para frecuencias comprendidas entre $0,2 f_s$ y $0,5 f_s$ viene dado por la siguiente expresión [8]:

$$\sigma = \frac{4,34}{0,22 + \sqrt{1 + 0,319 N}} \quad (1)$$

donde N es el número de modos normales. El valor de N se calcula mediante la expresión

$$N = B \eta(f) = B \left(\frac{4 \pi f^2 V}{c_0^3} + \frac{\pi f S}{2 c_0^2} + \frac{L}{8 c_0} \right)$$

siendo B el ancho de banda, V el volumen del recinto, f la

frecuencia central de la banda, S la superficie total del recinto y L su longitud total. Como se deduce de la expresión, a bajas frecuencias el resultado es independiente del tiempo de reverberación. Como ya se ha mencionado en el texto, por debajo de f_s el número de modos excitados es pequeño lo que produce un espectro irregular (debido a los valles y picos que aparecen) y una variación espacial mayor.

Por encima de f_s el número de modos normales suele ser suficiente para dar una distribución espacial más uniforme. Para estas frecuencias, suponiendo un campo difuso y despreciable la contribución del campo directo, la desviación estándar teórica viene dada por la siguiente expresión [9] :

$$\sigma = \frac{5,57}{\sqrt{1 + 0,238 BT}} \quad (2)$$

En la mayoría de los recintos esta fórmula suele dar resultados razonables ya por encima de 0,5 f_s . Las expresiones teóricas (1) y (2) se han representado con una línea discontinua y continua respectivamente junto con los valores calculados de la desviación estándar de los ejemplos de la Figura 2. Previamente en la literatura se ha publicado una comparación entre los datos experimentales y teóricos de la desviación estándar pero para un solo volumen y centrándose en frecuencias por debajo de los 100 Hz [10].

Básicamente, se han encontrado dos tendencias en los valores de la desviación estándar en función de la frecuencia de los niveles de presión sonora medidos en recintos de volúmenes comprendidos entre 15 y 60 m³. Los datos que se muestran en la Figura 2 son ejemplos de estas dos situaciones. La primera situación es la que se ilustra en los ejemplos (b) y (c). Los valores calculados de la desviación estándar se ajustan razonablemente bien a los que predicen los modelos teóricos: la expresión (1) describe aproximadamente el comportamiento de los resultados experimentales por debajo de f_s y por encima de la frecuencia de corte los datos experimentales se ajustan al modelo descrito por la expresión (2). El límite de validez de cada uno de los modelos, esto es el valor de f_s , es dependiente del volumen. En el ejemplo (c) el rango de validez del modelo descrito por la expresión (1) es menor por ser f_s inversamente proporcional al volumen del recinto. En otros recintos la tendencia observada en la desviación estándar es la que corresponde a los ejemplos (a) y (d). Por encima de f_s los valores de la desviación estándar se ajustan a los calculados según el modelo teórico descrito por la expresión (2) sin embargo, por debajo de f_s los valores experimentales son menores que los valores teóricos que predice la expresión (1). En este modelo para el cálculo teórico de la desviación estándar se asume que las paredes son perfectamente reflectantes y rígidas y los recintos se consideran regulares y sin amueblar. En este sentido, consideramos que la geometría del recinto pero fundamentalmente la absorción son los responsables de este comportamiento ya que en general se ha encontrado que, independientemente del volumen, se manifiesta más claramente en los recintos de menor tiempo de reverberación.

En estos modelos no se considera la contribución del campo directo, campo que se pone de manifiesto en las regiones próximas a la fuente sonora. En la referencia [11] se reescribe la expresión (2) con la contribución del campo directo. Esta contribución es importante para distancias entre la posición de micrófono y la fuente sonora menores de 1 m y a altas frecuencias. Sin embargo, 1 m es la mínima distancia entre la fuente sonora y cualquier posición de micrófono para medir por encima de los 100 Hz en las medidas de aislamiento. Por otro lado, a altas frecuencias la absorción es más alta y las medidas son dominadas por el campo directo más que por el campo reverberante. Esto podría explicar que en los ejemplos (a) y (b) a altas frecuencias los valores experimentales de la desviación estándar estén ligeramente por encima del valor que predice el modelo teórico.

Después de esta discusión, es obligado el análisis de la desviación estándar del promedio del nivel de presión sonora en el recinto. La desviación estándar es la contribución más importante a la incertidumbre final asociada al valor promedio de L_2 . Esta incertidumbre se combina con las incertidumbres de las otras magnitudes para dar la incertidumbre de la correspondiente magnitud de salida, DnT , R' , etc.

En la Tabla II se recogen para algunas bandas de tercio de octava, para un volumen de 20 m³ y distintos tiempos de reverberación la desviación estándar del valor promedio del nivel de presión sonora en el recinto receptor. Para cada frecuencia, el valor de la desviación estándar es el promedio de los recintos de 20 m³ con igual tiempo de reverberación. Al igual que en los ejemplos que se recogen en la Tabla II, en todo el rango de frecuencias y volúmenes estudiado el valor de la desviación estándar aumenta ligeramente cuando el tiempo de reverberación disminuye. Resultado razonable teniendo en cuenta que la desviación estándar de los valores de L_2 en distintas posiciones del recinto es, en un amplio margen de frecuencias, inversamente proporcional al tiempo de reverberación. Una mayor absorción favorece un campo sonoro más uniforme. En la Figura 3 para las frecuencias de 500 y 2000 Hz, y para dos tiempos de reverberación se representa en función del volumen el valor de la desviación estándar (promedio para cada volumen de todos los recintos con igual tiempo de reverberación). La desviación estándar no muestra una clara dependencia con el volumen del recinto y aumenta ligeramente con el tiempo de reverberación. De nuevo, este comportamiento es consecuencia de que la desviación estándar de los niveles a frecuencias por encima de f_s depende solo del tiempo de reverberación.

	σ (dB)	σ (dB)	σ (dB)	σ (dB)
Frecuencia (Hz)	T = 0,7 s	T = 0,6 s	T = 0,4 s	T = 0,3 s
100	1,02	1,11	1,33	1,45
200	0,95	0,92	1,13	1,26
400	0,43	0,65	0,59	0,84
500	0,42	0,57	0,67	0,63
800	0,47	0,56	0,67	0,71
1000	0,34	0,37	0,56	0,74
1600	0,35	0,40	0,45	0,56
2000	0,34	0,44	0,47	0,60
2500	0,34	0,49	0,46	0,58
4000	0,30	0,39	0,45	0,57

Tabla II. Desviación estándar del valor promedio de la presión sonora en el recinto receptor en función del tiempo de reverberación para algunas bandas de tercio de octava del rango de medida y para un volumen de 20 m³.

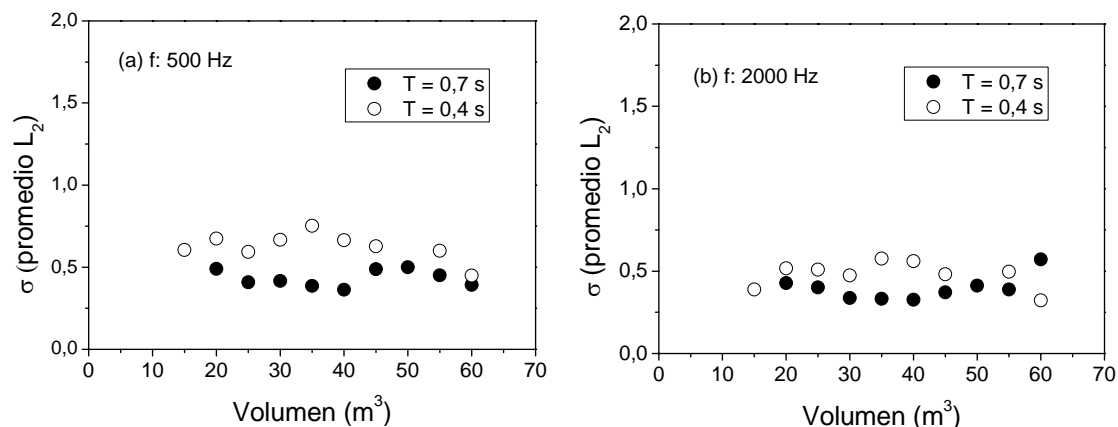


Figura 3. Desviación estándar del valor promedio del nivel de presión sonora en función del volumen para las bandas de tercio de octava de 500 y 2000 Hz y para dos tiempos de reverberación.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio de la dispersión de los niveles de presión sonora medidos en distintas posiciones en recintos de volúmenes comprendidos entre 15 y 60 m³ cuyo promedio energético determina el nivel de presión sonora en el recinto. Este tipo de análisis es interesante porque sirve para conocer que significa el valor promedio que calculamos y diseñar más apropiadamente los experimentos. Para representar la dispersión espacial de los niveles de presión sonora medidos en un recinto se ha escogido la desviación estándar. Para todos los recintos la desviación estándar disminuye cuando aumenta la frecuencia no obstante cuando se compara con los modelos teóricos se han encontrado dos tendencias. En algunos recintos los valores se ajustan razonablemente a los modelos teóricos en todo el rango de frecuencias. En otros recintos, a bajas frecuencias la dispersión es menor que la que predice el modelo teórico. Se debe tener en cuenta que los modelos teóricos se han deducido para recintos regulares, paredes rígidas y reflectantes y sin amueblar. Este comportamiento se traslada a la desviación estándar asociada al nivel promedio del nivel de presión sonora en el recinto: es independiente del volumen del recinto y disminuye sensiblemente cuando el tiempo de reverberación aumenta. Para un volumen dado la desviación estándar aumenta cuando disminuye el tiempo de reverberación.

5. REFERENCIAS

- [1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization, 1995.
- [2] Código Técnico de la Edificación: Documento Básico de Protección Frente al Ruido.
- [3] J. Castillo Cid and M. Sobreira Seoane, Uncertainty evaluation for airborne noise acoustic insulation measurements, *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, 2-7 September 2007.
- [4] R. V. Waterhouse, "Interference Patterns in Reverberant Sound Fields", *Journal of the Acoustical Society of America* **27** (2), 1955.
- [5] D. Lubman, "Precision of reverberant sound power measurements", *Journal of the Acoustical Society of America* **56** (2), 1974.
- [6] UNE – EN ISO 140-5: Mayo 1999: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y fachadas.
- [7] M. R. Schroeder, "Frequency-correlation functions of frequency responses in rooms", *Journal on the Acoustical Society of America* **34** (12), 1962, pp.1819-1823.
- [8] R. J. M. Craik, "On the accuracy of sound pressure level measurements in rooms", *Applied Acoustics* **29**, 1990, pp. 25-33.
- [9] M. R. Schroeder, "Effect of frequency and space averaging on the transmission responses of multimode media", *Journal of the Acoustical Society of America* **46** (1), 1969, pp. 277.283.
- [10] C. Hopkins y P. Turner, "Fields measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound fields at low frequencies", *Applied Acoustics* **66** (2005), pp. 1139-1382.
- [11] N. Michelsen, "Repeatability of sound insulations measurements", *Technical Report 36*, Danish Acoustical Laboratory (now DELTA Acoustics), Denmark.